事例紹介

# ロボットスーツHALの安全技術

Safety Techniques in Robot Suit HAL

山海嘉之[*1]　鍋嶌厚太[*2]　河本浩明[*1]
[*1]筑波大学大学院システム情報工学研究科　[*2]CYBERDYNE 株式会社
Yoshiyuki Sankai[*1], Cota Nabeshima[*2] *and* Hiroaki Kawamoto[*1]
[*1]Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba　[*2]CYBERDYNE Inc.

## 1. はじめに

ロボットスーツ HAL (以下 HAL) は, サイバニクス研究から生まれた装着型のロボットである. HAL は装着者の生体電位信号を読み取り, その信号に従った制御を行うことで, 装着者の身体運動を補助する仕組みを持っている.

歩行など下肢動作の補助を目的とした下肢型の HAL は, “ロボットスーツ HAL 福祉用” (以下, HAL 福祉用) として, CYBERDYNE 社によって実用化された. CYBERDYNE 社は継続して各種安全技術の開発に取り組み, 製品の改良・製造をすすめ, 2010 年春より本格的にレンタル販売・サポートを展開している.

本稿では 2011 年現在, 普及初期にある HAL 福祉用に用いている安全技術および安全に対する取り組みを概説する. また HAL 福祉用に備えられた安全機能と, IEC 61508-1 [1] などで注目されている機能安全の関連を解説する. 最後に装着型ロボット一般に共通して適用可能な安全コンポーネントの可能性について考察する.

## 2. HAL 福祉用の安全技術

HAL はその特性上, 人体に密着して電気的に動作し, 力学的な効果を人体に及ぼすシステムである. このようなシステムは一般的ではないため, 安全技術について十分に検討し, 適宜対応していく必要がある.

HAL のような新しい機器を安全に設計するには, リスクアセスメントに基づく開発手法を適用するのが適切と考えている. リスクアセスメントに基づく開発手法は, 国際安全規格 (ISO 12100-1 [2], IEC 61508-1 [1], IEC 60601-1 [3] など) でも要求されており, 標準的な方法と言える.

リスクアセスメントでは, 開発しようとする製品に対して, 予見できるハザード (“危険源” と訳される) を列挙し, その発生確率を割り当てる. 次に, 列挙されたハザードに対して, 人へ与えうる危害を列挙し, その重大さを割り当てる. 最後に割り当てられたハザードの発生確率と危害の重大さを組み合わせて, リスクレベルを割り当てる.

この割り当てられたリスクレベルが, 開発する際の指標となる. リスクの高いものから, ハザードの発生確率を下げる対策や, 危害の重大さを下げる対策 (“リスク低減方法” と呼ぶ) を講じ, 開発内容に盛り込んで行く. 対策の結果として残留するリスクが受容可能なレベルまで下がると期待できるならば, 実際の開発を進めることになる.

リスクアセスメントの各段階について記録に残すことで, すべての予見できるリスクと, それに対して施した対策のリストが得られることになる. このリストは, 対策漏れの有無や, 対策の妥当性を検証するための重要な資料となる.

CYBERDYNE 社における HAL 福祉用の開発では, リスクアセスメントを実施し, それ基づいてリスク低減方法を検討し, 開発に反映していった. 以下に, CYBERDYNE 社の開発で行った方法を解説する.

**リスク管理計画:** リスクアセスメントをどのように行うかを計画した. ハザードの発生確率, 危害の重大さのレベル, リスクレベルの定義を行い, リスクレベルの決定法としてリスクマトリクス法を計画した. リスク低減方法の検討と実施の手順および, 残留リスクの受容性判断基準を定めた. リスク管理を行う製品ライフサイクルの特定を行った.

**ハザード分析:** 下肢型 HAL のプロトタイプ開発時に明らかとなったハザードと, 予見できるハザードを列挙した. 体型が HAL に合わない, 装着部と皮膚の摩擦, 許容できない関節運動, 不安定な姿勢, コンポーネントの故障などが, HAL 福祉用に特徴的なハザードだった. ここでは発生確率の割り当ては行わなかった.

**初期リスク評価:** ハザードごとに初期リスクを評価する場合, 管理すべき項目数が増大してしまう. そこで, 各ハザードの結果として生じる危険状態 (装着者が晒される関節部へ過負荷, 装着部の圧迫など) を列挙した. 原因となるハザードが複数あるため, 列挙された危険状態の発生確率の割り当てには幅を持たせた.

次に, 危険状態の程度によって危害が異なるとして, 予測

原稿受付
キーワード：Human Assistive Robot, Risk Assessment, Risk Control, Safety Component
[*1]〒 305-8577 つくば市天王台 1-1-1
[*2]〒 305-0818 つくば市学園南 D25 街区 1
[*1]Tsukuba-shi, Ibaraki
[*2]Tsukuba-shi, Ibaraki

される危害を列挙した. 危害の重大さについても, 幅を持って割り当てた. これは, 温度の違いや負荷の程度によって, 危害の程度が異なることを反映するためである.

リスク管理計画に従って, リスクレベルを割り当てた. ここではリスク低減方法を一切考慮しない初期状態を想定したので, 実際よりも大きいと思われるリスクレベルが割り当てられた.

**リスク低減方法分析:** リスク管理計画に従って, リスク低減を考慮すべき危険状態を抜き出した. それぞれの危険状態および, その原因となるハザードに対して, リスク低減方法を分析した.

国際安全規格に具体的な方法が規定されている場合には, その規格への適合により, ハザードの発生確率が考慮不要な程度まで下がると仮定した. 技術的な方法では発生確率を下げられないハザードについては, この時点で運用上の制限 (操作手順の強制や器具の併用など), 取扱説明書への記載, 使用講習などの教育によるリスク低減方法を採るとした.

HAL 福祉用に特徴的なハザードは, “人体許容を超えたトルク/角速度/角度” であった. これらのハザードは危険状態 “関節部への過負荷” を誘引し, その過負荷の度合いによって, 関節の骨折, 脱臼, 捻挫, 筋肉・腱の挫傷, 炎症などの危害が予測された.

これらのハザードに対する本質的な安全対策として, “最大トルク/角速度が, 人体の許容するトルク/角速度を超えないアクチュエータを採用すること” と, さらに “人体が許容する範囲の両端に, 機械的なストッパーを設置すること” が導かれた. これらの本質的な安全対策に加え, 機能による安全対策 (トルク/角速度/角度の監視と出力制限) も導かれた.

運用による安全対策としては, 関節軸を合わせて装着する手順を作り, 取扱説明書に含めた. また安全かつ適切に使用するためのインストラクションコースを設定した. すべての使用者に対して, インストラクションの受講, 受講後の試験を課し, 試験の合格によって運用ライセンスを取得できることとした.

以上のように, HAL 福祉用の開発では, 安全技術を “製品システムに対する安全技術” と, “運用に伴う安全技術” の 2 系統に大きく分け, 両面から安全技術開発に取り組んだ.

実際の開発で行われたリスクアセスメントはより網羅的であり, 実施されたリスク低減方法は多岐に渡った. しかしながらこれらの対策を超えてハザードが生じてしまう場合に備え, 保険制度を活用するなど, 今後の制度設計の展開も考慮した対応を行った.

## 3. 安全機能と機能安全

HAL 福祉用に備わっている重要な安全機能の一つに, 単一故障検出機能がある. これはシステムを構成するコンポーネントの故障や不具合を検出する機能で, エラー報知や安全状態への移行を行うために必要な機能である.

単一故障検出機能については, FMEDA をシステムレベルに適用した故障解析を行って検討し, 設計を行っている. HAL 福祉用では, 複数コンポーネント間の相互監視, および多段階監視によって実現している. 監視には, ディスクリート部品だけでなく, ソフトウェアも用いている.

このような安全機能によって担保される安全は, 機能安全 (Functional Safety) と呼ばれている. 近年注目されている国際規格 IEC 61508-1 [1] は, 安全機能を有するシステムとその開発手法が満たすべき要求を定めた機能安全規格である.

IEC 61508-1 では, システムの安全機能が故障したときに生じるリスクの高さにより, Safety Integrity Level (SIL) を割り当てる. 割り当てられた SIL を満たす開発を行い, かつ電装系について “検出不能な危険側故障率” を所定のレベルまで下げることが要求されている.

リスクアセスメントの結果から, 安全機能が故障した場合の HAL 福祉用のリスクは, IEC 61508-1 で想定されているレベルより低かった. そのため IEC 61508-1 への適合は直接的には要求されないが, IEC 61508-1 に記載されている機能安全の概念と技法は有効と考えられる.

例えば HAL 福祉用の持つ単一故障検出機能とその後の安全状態への移行は, “検出不能な危険側故障率” を下げることに相当している. 特に IEC 61508-5 [4] には機能安全のための技法が記載されており, 参考になる点が多い.

現在策定中の “ISO 13482: パーソナルケアロボットへの安全要求 [5]” でも, IEC 61508-1 や ISO 13849-1 [6] に代表される機能安全に関する要求が含まれる見込みである. 単一故障検出機能は, ISO 13482 への適合のためにも必要な機能になると考えられる.

## 4. 共通安全コンポーネントの可能性

IEC 61508-1 では, SIL の形で安全機能を担う電装系とソフトウェア (“安全関連部” と呼ばれる) の信頼性を求めている. もし開発しようとするシステムの安全関連部と一致する IEC 61508-1 に適合した安全コンポーネントが存在するならば, その安全コンポーネントをシステムに導入することで, 最終的なシステムを IEC 61508-1 に適合させやすくなると思われる.

しかしながら, 安全関連部を特定するためには, Sect.2 で紹介したようなリスクアセスメントを行わなければならない. リスクアセスメントの結果, ロボットに高い SIL が求められるならば, Sect.2 のように本質的な安全対策を組み合わせることで, 満たすべき SIL を下げられるかもしれない. 要求される SIL が低くなるならば, 適当な SIL の安全コン

ポーネントを安全関連部として採用できる可能性がある.

危害を受ける人間が 1 人程度となるパーソナルケア (ピープルケアではない) ロボットの範囲では, 最大限見積もっても満たすべき SIL は SIL3 程度と考えられる. SIL3 の安全コンポーネントが手に入ればよいが, たとえ SIL2 のものであっても (他の安全対策と組み合わせることが前提だが), 十分に利用可能性はあると考えられる.

装着型ロボットに共通する安全コンポーネントの可能性も考えられる. しかしながら, 装着型ロボット用安全コンポーネントが SIL2 と仮定した場合, 制御系のアーキテクチャが “フォールトトレランス 1” に制限されてしまう.

フォールトトレランス 1 は安全関連部の二重化を指しており, 単純計算して電力消費が 2 倍, 電装系のコストと重量が 2 倍になることを意味している. これは人と密着して移動し, 温度管理が必要な装着型ロボットには逆にリスクとなりうる制限と言える.

設計者はリスクとベネフィットのバランスを取って, 安全関連部を実現させる必要がある. もし共通安全コンポーネントにフォールトトレランス 0 と 1 を選択できる構造があれば, 製造者にとって採用できる幅が広がり, 可用性が高いと考えられる.

## 5. お わ り に

HAL 福祉用は現在普及初期にあり, その安全性をどのように担保しているかは使用者の関心を引いている. HAL 福祉用における安全技術は, 本質的な安全対策, 機能による安全対策, 運用による安全対策, 保険による対策の合わせ技で行っている.

パーソナルケアロボットは, 従来の産業機械やプラントと異なり, 人間をハザードから空間的に隔離できないシステムである. そのためシステム全体に対するリスクアセスメントに基づく開発が必要となる.

リスクアセスメントでは, ハザードとそれに対するリスク低減方法に関する過去の知見が必須である. 装着型ロボットのリスクアセスメントでは, 人と密着して動く電気電子機器, すなわち IEC 60601-1 [3] に見られる医療機器の知見が有用と考えられる. 歩行補助型ロボットの設計では, 義足の国際安全規格 ISO 10328 [7] も参考になるだろう.

パーソナルケアロボットが産業化するためには, リスクアセスメントに基づく開発を行い, 安全なパーソナルケアロボットを市場に提供する必要がある. 共通安全コンポーネントが登場し, それが利用可能となれば, 多くの開発者が安全なパーソナルケアロボットを容易に開発できるようになるだろう. そのとき, 今よりも多様なパーソナルケアロボットが製品として誕生し, 産業用ロボットに並ぶ大きな市場になるのではと期待している.

**謝 辞** 本研究は, NEDO より CYBERDYNE 株式会社と筑波大学が受託した生活支援ロボット実用化プロジェクトの成果の一部である.

## 参 考 文 献

[1] IEC. *IEC 61508-1 Ed.2.0: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements.* International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2010.

[2] ISO. *ISO 12100-1: Safety of machinery – Basic concepts, general principles for design – Part 1: Basic terminology, methodology.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.

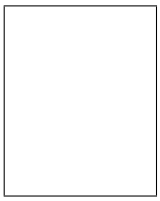
[3] IEC. *IEC 60601-1 Ed.3.0: Medical electrical equipment – Part 1: General requirements for basic safety and essential performance.* International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2005.

[4] IEC. *IEC 61508-5 Ed.2.0: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 5: Examples of methods for the determination of safety integrity levels.* International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2010.

[5] ISO. *ISO/DIS 13482: Robots and robotic devices – Safety requirements – Non-medical personal care robot.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2011.

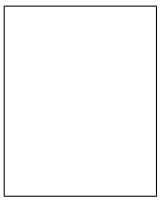
[6] ISO. *ISO 13849-1: Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.

[7] ISO. *ISO 10328: Prosthetics – Structural testing of lower-limb prostheses – Requirements and test methods.* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.



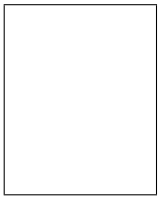
**山海嘉之** (Yoshiyuki Sankai)

1987 年筑波大学大学院工学研究科修了. 工学博士取得後, 日本学振特別研究員, 筑波大学機能工学系助手, 講師, 助教授, 米国 Baylor 医科大学客員教授. 2003 年より筑波大学大学院システム情報工学研究科教授. 新学術領域【サイバニクス】を開拓, 推進中. G-COE サイバニクス国際拠点リーダー, FIRST サイバニクス拠点統括者. 全国発明表彰大賞受賞. (日本ロボット学会正会員)



**鍋嶌厚太** (Cota Nabeshima)

2009 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了. 博士 (情報理工学). 2009 年より CYBERDYNE 株式会社研究員. 人が道具へ適応するメカニズムの解明をテーマに, 現在は装着型ロボットの安全技術の研究開発に従事. NEDO 生活支援ロボット実用化 PJ 業務管理者 (CYBERDYNE). 日本ロボット学会研究奨励賞, IROS Conference Best Reviewer Award.
(日本ロボット学会正会員)



**河本浩明** (Hiroaki Kawamoto)

2004 年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士課程修了. 博士 (工学). 2005 年医療機器センター厚労科研リサーチレジデントを経て, 2008 年より筑波大学システム情報工学研究科助教. 人支援型ロボット, 生体運動制御に関する研究に従事. 日本機械学会等の会員. 日本ロボット学会論文賞受賞. (日本ロボット学会正会員)